

Rehabilitación sustentable de vivienda barrial masiva en clima semi-árido: Evaluación termo-energética y microeconómica

Sustainable refurbishment of massive neighborhood housing located in semi-arid climate: Micro economic and energy-thermal evaluation

Irene Blasco Lucas (*)

RESUMEN

Se presenta el análisis de la factibilidad técnico-económica de rehabilitación edilicia de la envolvente en una tipología de vivienda barrial masiva existente en San Juan, Argentina, ciudad oasis con clima semi-árido. A tal fin se proponen variantes tecnológicas pasivas que mejoran su desempeño térmico-energético y se desarrollan procedimientos adaptados a la disponibilidad de datos locales, que abarcan aspectos climáticos, termo-energéticos y económicos en el ámbito edilicio. Las ocho alternativas de mejoras propuestas permiten ahorros en consumos de climatización que varían entre 33% y 56%, para inversiones iniciales entre € 2,582.00 y € 4,186.00 a precios de setiembre de 2019, capital que se recupera entre 6.8 y 11 años, en un ciclo de vida de 25 años con una tasa constante de interés anual de 3%. La metodología propuesta es apta para decidir políticas en el tema destinadas a viviendas sociales, y constituye una sólida base para implementar planes de promoción.

Palabras clave: Rehabilitación barrial, Eficiencia termo-energética, Evaluación microeconómica.

ABSTRACT

The analysis of the technical-economic feasibility of the building envelope refurbishment in a typology of massive neighborhood housing existing in San Juan, Argentina, an oasis city with semi-arid climate, is presented. To meet this target, passive technological variants that improve its energy-thermal performance and procedures adapted to the availability of local data are developed, covering climatic, energy-thermal and economic aspects in the building field. The eight alternatives for improvements proposed allow savings in air conditioning consumption that vary between 33% and 56%, for initial investments between € 2,582.00 and € 4,186.00 at prices in September 2019, capital that is recovered between 6.8 and 11 years, in a 25-year of life-cycle with a constant annual interest rate of 3%. The proposed methodology is suitable for deciding on social housing policies and constitutes a solid basis for implementing promotion plans.

Keywords: neighborhood refurbishment, thermal-energy efficiency, micro-economic assessment.

(*) Dr.-Arq. Docente-Investigadora Categoría I. Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat, Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

Persona de contacto/Corresponding author: iblasco@fau.com.ar (I. Blasco Lucas)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1326-895X> (I. Blasco Lucas)

Cómo citar este artículo/Citation: Blasco Lucas, Irene (2021). Rehabilitación sustentable de vivienda barrial masiva en clima semi-árido: Evaluación termo-energética y microeconómica. *Informes de la Construcción*, 73(561): e375. <https://doi.org/10.3989/ic.62118>

Copyright: © 2021 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 05/12/2017
Aceptado/Accepted: 06/04/2020
Publicado on-line/Published on-line: 16/03/2021

1. INTRODUCCIÓN

Como menciona Thuvander (1), desde el año 1999 Kohler & Hassler ya hablaban del concepto de “*stock edilicio*” al referirse a la edificación existente en las ciudades, calificándolo como un importante recurso material en un futuro cercano, considerando que el uso óptimo e intensivo del mismo podría incidir en forma relevante para aliviar la presión sobre el ambiente. Sin embargo, recién a partir del año 2004 la Unión Europea (UE) reconoce su potencial de ahorro energético (2), y demuestra una fuerte voluntad de promover renovaciones y modernizaciones edilicias sustanciales que incorporen medidas de eficiencia energética, lanzando programas de financiamiento específicos que dieron lugar al desarrollo de relevantes proyectos. De éstos cabe mencionar a: TABULA (3), EPISCOPE (4), BUILD UPON2 (5), HRE (6), 4RinEU (7), iBRoad (8), EffiBuilding (9), OurB (10), RenoZEB (11), HEART (12), y STUNNING (13), los cuales han contribuido al desarrollo de tecnologías, recomendaciones, guías, bases de datos, herramientas metodológicas, y a la estandarización de procedimientos para la aplicación de políticas públicas en este tema, respetando la Directiva UE de Eficiencia Energética de Edificios (EPBD) (14), que es revisada y actualizada periódicamente (15), a la vez que es adaptada a las diferentes realidades de los Estados miembros que la integran. La mayoría de estos proyectos se centran en las distintas tipologías residenciales, debido a su importante volumen construido, coincidiendo que es posible lograr un ahorro energético mínimo de 41%, y algunos de ellos plantean lograr un consumo energético casi nulo (nZEB). Los objetivos fijados en la EPBD incluyen garantizar la conveniencia económica de las medidas propuestas en los certificados de eficiencia energética (16) (17) (18) (19), y obtener óptimos beneficios (20) (21) a través de la estimación de los plazos de recuperación de la inversión o de la rentabilidad durante su ciclo de vida útil.

No se ha logrado aún una amplia extrapolación a la República Argentina de la experiencia ganada y de los resultados obtenidos en los antecedentes antes mencionados, ni de muchos otros existentes sobre el tema de la rehabilitación energética edilicia en Estados miembro de la UE y en distintos países a nivel mundial, aunque se han llevado a cabo proyectos de investigación para casos puntuales que abordan aspectos parciales (22) (23) y se ha incursionado en la implementación de normativas relacionadas que revisten carácter voluntario (24) (25) (26).

El hecho que la Presidencia de Argentina decretara en diciembre de 2015 estado de emergencia energética hasta fines de 2017 (27), aduciendo que el sistema se encontraba al borde del colapso, incitó a realizar análisis sectoriales para emprender políticas de eficiencia energética que contribuyan a paliar esta situación en el modo más efectivo posible. En (28) se demuestra que, por su magnitud y tasa de crecimiento, los edificios son el componente más significativo de la demanda de energía a nivel nacional, y dentro de ella, el sector residencial es el más indicado (29), pues por un lado, representa el 25,30% del consumo nacional de energía, y por otro, tuvo un incremento de 132% en el período 1999-2017, siendo el segundo en orden de magnitud luego del de transporte (30). Estos valores ratifican la tendencia presentada en el año 2008 (31) cuando se estimó que el impacto del ahorro energético incorporando medidas de sustentabilidad edilicia dentro del sector residencial ascendería a 76% y respecto al balance energético nacional total podía alcanzar más del 16%.

Entre varios antecedentes específicos que abordan aspectos parciales de la problemática objeto de la presente investigación, se pueden mencionar el análisis térmico-energético y económico de viviendas sociales en Mendoza (32) (33), estudios a gran escala sobre eficiencia energética en sector residencial y terciarios de zonas periféricas metropolitanas de Buenos Aires y La Plata (34), y desarrollo de una herramienta de cálculo para la optimización económica de sistemas solares pasivos que se fue perfeccionando desde 1990 en adelante (35) (36). A partir de 1999 se desarrollan investigaciones en esta línea sobre muestras residenciales localizadas en zonas suburbanas de la ciudad de San Juan, acotadas a las viviendas individuales en planta baja ubicadas en las micro urbanizaciones barriales de mayor escala, a fin de realizar un diagnóstico general, y posteriormente proponer tecnologías sencillas de mejora de la envolvente edilicia (37) (38), análisis que estuvieron condicionados por la escasez y dispersión de los datos disponibles, en función de los cuales se construyeron los procedimientos metodológicos a lo largo del tiempo (39) (40).

En la Provincia de San Juan, conforme a los datos del período 2000-2016, última serie publicada tanto por la Secretaría de Energía (41) como por ENARGAS (42), se observa que desde el año 2008 el sector residencial ocupa el primer lugar de importancia, representando en 2016 el 48,55% del consumo eléctrico y el 32,66% del consumo de gas. Además, la cantidad de usuarios residenciales conectados a estos servicios alcanzan respectivamente el 91% y el 97%. En la ciudad-oasis de San Juan existe un elevado porcentaje de barrios construidos con baja densidad edilicia, destinados a familias de nivel socioeconómico medio y bajo, cuyo consumo energético aumentó entre 25% y 100% durante el período 1999-2013. La característica telúrica con máximo nivel de riesgo sísmico de la zona ha propiciado que se ponderen los controles de sismorresistencia en la edificación, descuidando su calidad en las condiciones de confort higro-térmico, lo cual resulta crítico debido al clima semi-árido del lugar. La ciudad se reconstruyó paulatinamente después del terremoto destructivo de 1944, por lo tanto, un elevado porcentaje de las viviendas ha superado ya los 50 años que se estiman como vida útil en los edificios, y otra porción igualmente importante tiene ya más de 30 años.

Los antecedentes citados y las realidades nacional de Argentina y de la ciudad de San Juan brevemente descritas, a la vez destacan la importancia del tema y justifican el abordaje de la presente investigación, cuyo objetivo es analizar la factibilidad técnico-económica de rehabilitación edilicia mediante variantes tecnológicas pasivas que mejoren el desempeño térmico-energético de la envolvente en una tipología de vivienda.

2. METODOLOGÍA

En base a los antecedentes mencionados en el título anterior, condicionada por las limitaciones presupuestarias y de acceso a la información, la investigación se compuso de tres instancias que abarcan varios aspectos:

a. Análisis de un “Año Tipo Climático” (ATC) conformado por el promedio de 10 años, aplicando cuatro métodos para determinar las estrategias de diseño apropiadas para la región.

- **Elaboración del ATC:** Se utilizaron las mediciones registradas durante los años 2002 a 2012 (43)

con la estación meteorológica marca DAVIS instalada en el techo del Instituto de Energía Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan (IEE-FI-UNSJ). Los parámetros climáticos procesados fueron Temperatura, Humedad Relativa e Irradiancia Solar. Las bases de datos se conformaron en planillas electrónicas de MS-Excel programadas.

- **Definición de estrategias bioclimáticas:** El cómputo de las necesidades temporales de climatización mediante estrategias de diseño adaptadas al clima se realizó aplicando los modelos Bruce Novell ampliado (BNA) (44), Architectural Bioclimatic Classification (45), Método Mahony-Evans (MET-ME) (46) y Givoni-Watson-Szockolay - Estrategias Bioclimáticas Horarias (GWS-EBH) (47).

b. Diagnóstico y caracterización higrotérmica y energética de las viviendas, y de sus usuarios, a partir de cómputos estacionarios, mediciones, y encuestas.

- **Aplicación del “Modelo para cálculo de K y G” (KG-MOD)** (47): Se utiliza este soporte informático elaborado con los procedimientos recomendados por las Normas IRAM para acondicionamiento térmico edilicio (48) a fin de analizar la vivienda original y los casos mejorados.
- **Evaluación de los consumos energéticos reales:** Se usan los registros provistos por las empresas distribuidoras de gas y electricidad, en tres años testigo (1999, 2006 y 2013).
- **Análisis del monitoreo higrotérmico:** Los datos se registraron con dataloggers tipo HOBO y su tratamiento estadístico se hizo con el programa PROMEDI-HTL (Procesamiento de Mediciones Higrotérmicas y Lumínicas) (47).
- **Relevamiento de encuestas:** Se recolectaron datos de tipo demográfico y de opinión sobre amplia muestra, cuyo procesamiento permitió obtener información respecto la composición familiar, el equipamiento de la vivienda y las apreciaciones de los usuarios sobre su nivel de confort.

c. Evaluación micro-económica en el ciclo de vida (EMECV) de las diferentes alternativas seleccionadas para contribuir a una mayor eficiencia termo-energética de la vivienda.

- **Uso del método del Valor Presente (VP)** (49) también denominado de análisis de Costos en el Ciclo de Vida (CCV) (50).
- **Selección mediante Índices de Rentabilidad (IR):** el Valor Actualizado Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Tiempo de Retorno o Recuperación de la Inversión (TR), dado que los tres en conjunto brindan una clara información para tomar decisiones bien fundadas (51). La interpretación de los resultados está sujeta a las condiciones de entorno y a las políticas que se derivan de ellas.

3. ATC Y ESTRATEGIAS BIOCLIMÁTICAS

Del ATC horario se obtienen días tipo mensuales, que se representan en gráficas lineales (Figuras 1 y 2) y de superficies (Figura 3), en sus valores estadísticos mensuales medios, máximos y mínimos, como también los calculados en base a ellos, tales como las amplitudes de temperatura y humedad relativa, y las horas diarias de asoleamiento.

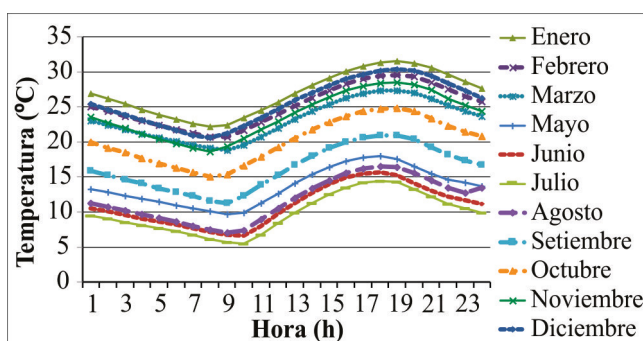


Figura 1. Gráfica lineal de Temperaturas medias en días tipo mensuales del ATC.

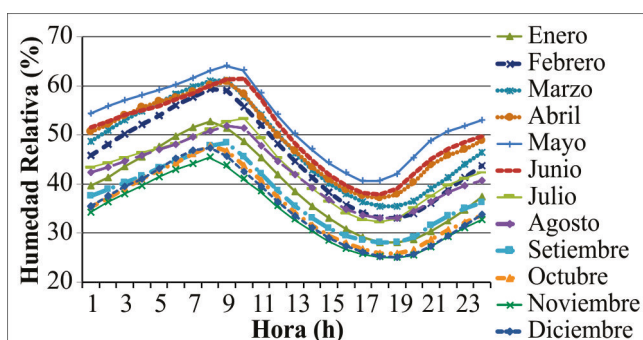


Figura 2. Gráfica lineal de Humedad Relativa media en días tipo mensuales del ATC.

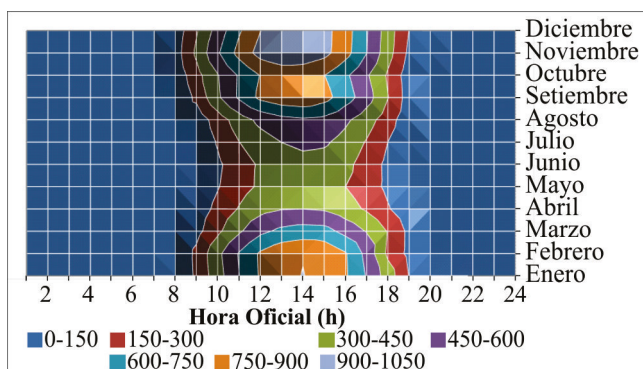


Figura 3. Gráfica de superficie de Irradiancia media en días tipo mensuales del ATC.

Tres de los cuatro modelos utilizados para la definición de las estrategias bioclimáticas en base a los datos del ATC permiten obtener resultados cuali-cuantitativos en distintos niveles de desagregación, y uno solo cualitativos. El

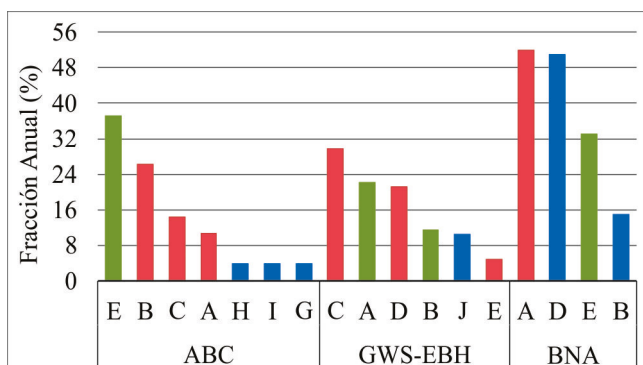


Figura 4. Gráfica de Pareto con validez anual de estrategias bioclimáticas según tres métodos cuantitativos, en base al ATC.

desglose de las estrategias es menor en BNA y mayor en MET-ME que es un buen complemento de los otros modelos, pues realiza recomendaciones edilicias y constructivas. En la Tabla 1 y la Figura 4 se sintetizan los resultados obtenidos ordenados de mayor a menor para cada método. Todos coinciden en las necesidades con cierto margen de diferencia en los valores.

Tabla 1. Estrategias Bioclimáticas según los cuatro Modelos. Ref.: verde, confort; rosa, calefacción; celeste, refrescamiento.

Modelo	Código	% Anual Aspecto	Estrategias
ABC	E	37.1	Confort térmico
	B	26.3	Calefacción solar
	C	14.4	Inercia térmica (Calefacción)
	A	10.8	Calefacción artificial
	H	3.8	Inercia térmica (Refrescamiento)
	I	3.8	Refrescamiento evaporativo
	G	3.8	Ventilación nocturna
GWS-EBH	C	29.9	Inercia térmica + ganancias internas
	A	22.2	Confort térmico + Sombra
	D	21.2	Inercia térmica + ganancias internas + solar pasiva
	B	11.5	Confort térmico ampliado + sombra
	J	10.4	Inercia térmica + enfriamiento evaporativo + ventilación selectiva
	E	4.9	Inercia térmica + ganancias internas + solar pasiva + solar activa
BNA	A	52.0	Calefacción
	D	51.0	Sombra
	E	33.0	Confort
	B	15.0	Refrescamiento evaporativo
MET-ME	A	Tipología	Organización cerrada con patio interior, y edificio compacto
	B	Muros, techos y pisos	Pesados en el exterior y en el interior, con transmisión térmica diferida más de 8 horas
	C	Ventanas	10% a 20% de superficie de muros, con protección solar, ubicadas al Norte y al Sur, a la altura del cuerpo y a barlovento para favorecer ventilación cruzada
	D	Entorno	Refrescamiento evaporativo

4. DIAGNÓSTICO HIGROTÉRMICO-ENERGÉTICO

El caso seleccionado para realizar el estudio es el barrio Teniente General Pedro Eugenio Aramburu (Ar). Construido entre los años 1983 y 1985, dista 5 Km del centro en el suburbio Noroeste de la ciudad de San Juan, Argentina (9) (Figura 5). Las coordenadas terrestres de la ciudad son: Latitud $-31^{\circ} 32'$; Longitud $-68^{\circ} 71'$, y Altura sobre el nivel del mar 620m.

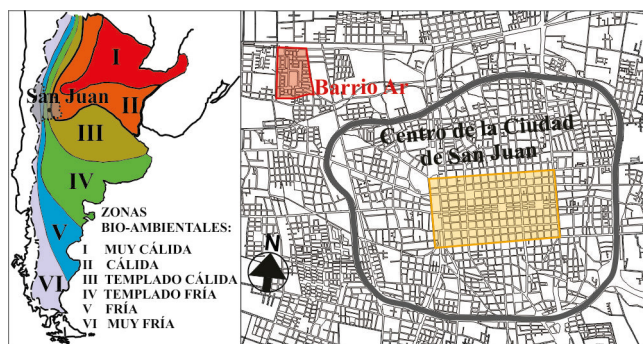


Figura 5. Zonas Bioambientales de Argentina según Norma IRAM 11603 (2012) con ubicación de la Provincia y la ciudad de San Juan (Izquierda). Localización del barrio Ar-(Derecha).

Ar está compuesto por 103 bloques edilicios con 226 departamentos y 383 viviendas individuales de 2, 3 y 4 dormitorios (Figura 6). Se acota el análisis a la tipología aislada de 3 dormitorios, por ser la más numerosa (Figura 7). La distribución de las viviendas en Ar es apareada en forma continua sin dejar espacios libres laterales, pero cuentan con 3m de retiro en el frente, y un espacio semi-cubierto amplio en el ingreso.

La tipología se implanta con su fachada orientada indistintamente hacia cualquier cuadrante, estando el 56% casi en partes iguales en dirección N-S y S-N, que son las óptimas para favorecer la ventilación cruzada, según se concluyó en el análisis bioclimático. La superficie cubierta es de 71.18m^2 y el volumen de 170.83m^3 , con 0.75m^{-1} de Factor de Forma, 19 % de Coeficiente de Fenestración, y 20.5% de volumen relativo de masa térmica (39). Los muros exteriores son de bloques huecos de hormigón de 19cm de espesor revocados en ambas caras, la cubierta está compuesta por 10cm de hormigón armado y 8cm de granulado volcánico, y las carpinterías son de chapa doblada de baja calidad y vidrio simple. En la Tabla 2 se resume la Transmitancia Térmica K de los componentes constructivos y su porcentaje de desviación respecto los valores admisibles según la Norma IRAM 11605 (1996) para una calidad media de edificación (B) en la Zona Bioambiental IIIa donde se ubica el barrio (Figura 5). Los K de los muros superan entre 22% y 133% dichos umbrales. El K total de la envolvente es de $1.69\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$. El Coeficiente Volumétrico de Pérdidas de Calor Gcal es $2.87\text{ W/m}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$, y el de Refrigeración Gref 40.83 W/m^3 , superando respectivamente en 69% y 54% los valores máximos calculados conforme las Normas IRAM 11604 (2001) y 11659-2 (2007) (48), que resultan ser $1.7\text{ W/m}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$ para Gcal adm, y 27 W/m^3 para Gref adm. La carga térmica de calefacción (Qcal) se calcula según la Norma IRAM 11604 (2001) y la de refrigeración (Qref) como lo estipulan las Normas IRAM 11659-1 (2004) y 11659-2 (2007), resultando respectivamente 14.99 MWh y 6.98 MWh para temperaturas de confort de 20°C en invierno y 24°C en verano, con 1000h promedio de necesidad de refrescamiento (42 días) determinadas a partir del ATC. En Figura 8 se presentan los resultados de los principales Índices morfológico-dimensionales y térmico-energéticos de calefacción y refrigeración.

Esto implica una carga térmica total anual de 21.36 MWh. Sin embargo, los cálculos realizados en base a mediciones reales indican consumos menores en 76% y 82% respectiva-



Figura 6. Planimetría del Barrio Ar (Izquierda). Vistas (Derecha) de vivienda colectiva (Superior) e individual (Inferior).



Figura 7. Vistas, planta y fachada de las viviendas apareadas de tres dormitorios.

mente, sin alcanzar tales condiciones de confort, las cuales fueron relevadas mediante encuestas y contrastadas con monitoreo térmico en instancias previas de investigación, oportunamente publicadas en (37) (38) (52).

Aplicando el procedimiento elaborado en Blasco Lucas et al. (52) sobre los tres años testigo analizados, se estima que mientras en 1999 el 81% de las viviendas carecían de equipos de aire acondicionado (AA), en 2013 el 83% poseían artefactos de AA frío-calor con consumo normal e intensivo, lo cual se tradujo en la demanda energética, alcanzando incrementos de 242% en la eléctrica de 1999 a 2013, y de 257% en 2006-2013. El consumo de gas utilizado para calefacción, disminuyó 13% de 1999 a 2006, y aumentó solo un 30% de 2006 a 2013.

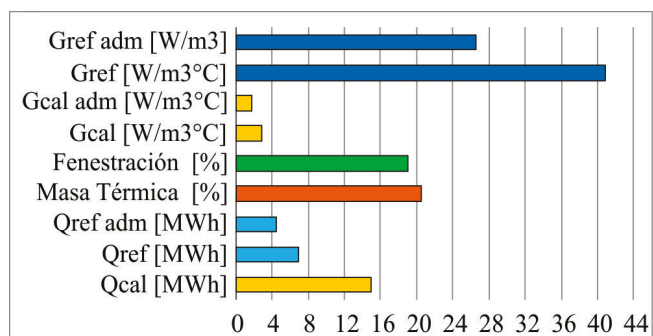


Figura 8. Índices morfológico-dimensionales y termo-energéticos de calefacción y refrigeración.

Tabla 2. Transmitancia Térmica K de componentes para verano e invierno y porcentaje de diferencia con los admisibles estipulados por la Norma IRAM 11605 (1996).

COMPONENTE	Verano			Invierno		
	[W/m ² °C]		Dif. [%]	[W/m ² °C]		Dif. [%]
	Kv	Kadm		Ki	Kadm	
Bloque	2.33	1.25	-86	2.33	1.00	-133
Lindero	1.93	1.25	-54	1.93	1.00	-93
Techo	0.62	0.48	-29	0.65	0.83	22
Piso	0.43	0.48	11	0.40	0.83	51
Puertas	2.29	1.25	-83	2.29	1.00	-129
Vidrio	5.75	1.25	-360	5.75	1.00	-475
Chapa	5.88	1.25	-371	5.88	1.00	-488

En base al diagnóstico obtenido, en la Tabla 3 se proponen medidas constructivas sencillas de mejoras, que responden a algunas de las estrategias bioclimáticas antes detalladas. Las de validez anual aportan a la conservación energética mediante la incorporación de aislaciones térmicas y sellado de infiltraciones, mientras que las apropiadas solo para verano, proveen sombra, refrescamiento evaporativo, y ventilación cruzada selectiva mediante tubos en las viviendas orientadas hacia el Este o el Oeste, cuya cantidad representa el 44% del total. De este modo se conforman siete posibilidades, las cuales se combinan para dar lugar a ocho alternativas, cuatro de orientación al Norte y cuatro al Este, que se identifican con letras. A fin de facilitar el cómputo métrico se dibujan los detalles de cada variante, como lo representan las Figuras 9 y 10, para el caso F.

Tabla 3. Alternativas constructivas por estrategia bioclimática y orientación de la vivienda.

Orientación Vivienda	Alternativa	Conservación: Aislación Térmica				Ventilación		Sombras	
		1	2	3	4	5	6	7	
		Techo	Muros	Aberturas (Burletes)	Ventanas (Persianas)	Tubos	Pérgolas	Vegetación	
NS	A								
	B								
	C								
	D								
EO	E								
	F								
	G								
	H								

Se realiza el cálculo térmico-energético de cada alternativa y se determina el porcentaje de ahorro energético comparado a la vivienda original. Estos valores relativos que varían entre 33% y 56% (Tabla 4), se aplican sobre los consumos reales incrementados en un 10% para gas y un 50% para electricidad, atendiendo parcialmente la tendencia creciente descrita en

párrafos anteriores, y se multiplican por los costos unitarios de cada fluido energético.

5. MICROECONOMÍA EN EL CICLO DE VIDA

El cálculo de costos de cada alternativa se obtiene sumando los precios de mercado de las estrategias que la componen -a valores de septiembre de 2019- reducidos a la unidad de superficie, y multiplicados por el área respectiva (53). En la Tabla 4 se muestran los resultados de costos y de ahorro energético para cada caso. Los costos de operación y mantenimiento anual se consideran como porcentaje de la Inversión Inicial (Ii) para cada estrategia en un ciclo de vida de 25 años, -pues las viviendas ya tienen 30 años-, y se suman, obteniendo los costos correspondientes por alternativa. El método de Valor Presente (VP) es el más adecuado de las matemáticas financieras para evaluar proyectos de este tipo, cuya mayor Ii se compensa mediante el ahorro de energía convencional a lo largo de la vida útil del bien, en este caso, la vivienda (17) (51). Este beneficio anual debe restarse en la ecuación de flujo de fondos de VP, en valor monetario, el cual se calcula multiplicándolo por el precio unitario de cada fluido energético, considerando incrementos de 30% para gas y de 100% para electricidad, conforme a los anuncios del Gobierno, que hará efectivos a partir de octubre.

Tabla 4. Resultados de costos (€ = \$AR 65.4) y de ahorro energético (%) por alternativa.

Alternativa	Inversión inicial Ii (€)	Mantenim. Anual (€)	Valor Anual VA Operación (€)	Ahorro de electricidad (%)	Ahorro de gas (%)	Ahorro total (%)
A	2,582	12	207	4	29	33
B	3,009	14	244	6	29	35
C	3,405	16	279	15	29	44
D	3,405	16	279	13	41	54
E	3,608	17	296	7	29	36
F	4,186	20	347	7	29	36
G	3,608	17	296	25	29	54
H	3,608	17	296	15	41	56
Prom.	3,426	16	281	12	32	43

Para la estimación del VAN se aplica una tasa constante de interés anual apropiada para una valoración social (3%), la cual salva parcialmente la gran diferencia de precios que existe entre los inherentes a la construcción y a la energía, siendo muchísimo más elevados los primeros. También se incluye en la ecuación el Valor Residual (VR) del bien al finalizar el período de cálculo, pues su vida útil aún continúa y tiene un valor agregado que se incrementa a perpetuidad. Se ha considerado que las mejoras le habrán aumentado el valor en un 10% y que el VR de las mejoras será un 15% del nuevo valor del inmueble por tener incorporada alguna alternativa. La tasación de la vivienda se realiza a los valores actuales del mercado inmobiliario, resultando su VR un monto de € 8,830.28.

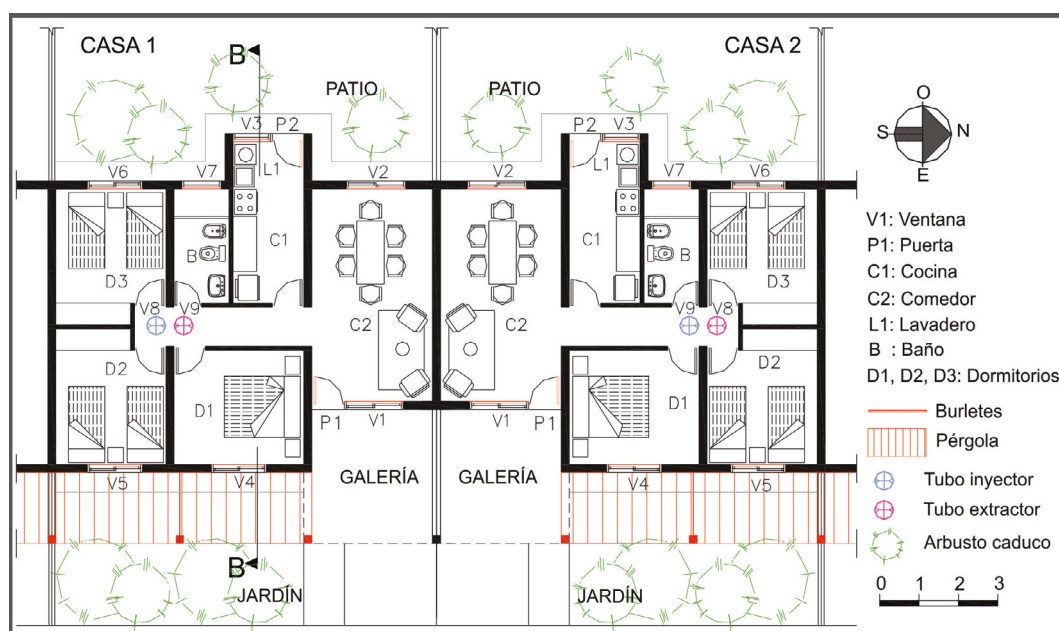


Figura 9. Planta de las viviendas con las mejoras propuestas en la alternativa F.

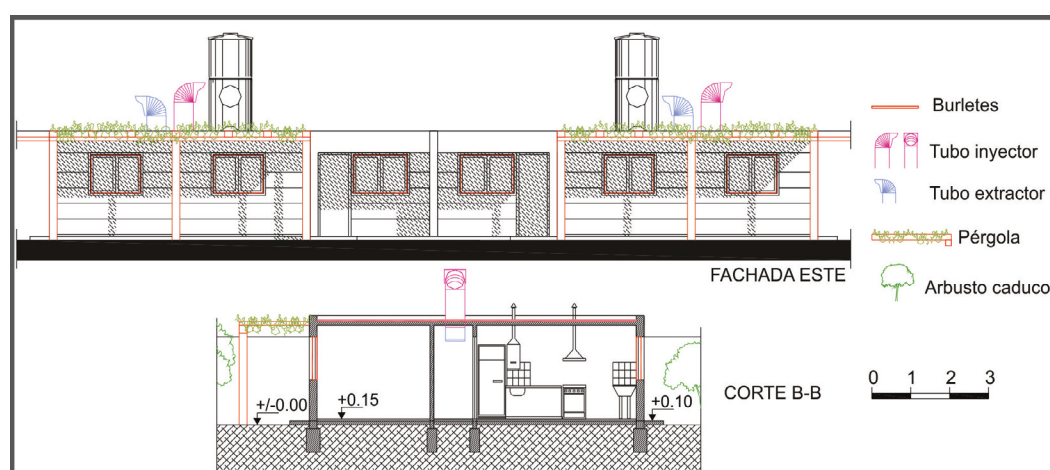


Figura 10. Fachada y corte de las viviendas con las mejoras propuestas en la alternativa F.

Tabla 5. Índices de Rentabilidad (IR) por alternativa.

Alternativa	VAN (€)	TIR (%)	TR (años)
A	2126	5.7	6.8
B	1736	4.3	7.8
C	1676	3.6	8.5
D	1813	4.6	8.3
E	1154	9.4	9.4
F	526	4.9	11.0
G	1851	5.0	8.5
H	1675	4.2	8.7
Promedio	1569	4.5	8.6

En la Tabla 5 y la Figura 11 se exhiben los resultados obtenidos. La conveniencia de cada propuesta se determina cuando el VAN es positivo y la TIR supera la tasa de interés utilizada para el cálculo, siendo ambos mejores a mayor valor. A su vez, un menor TR hace más atractivo un proyecto.

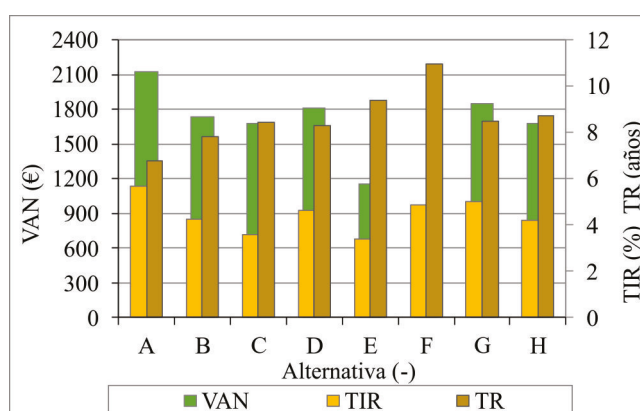


Figura 11. Índices de rentabilidad microeconómica (VAN, TIR y TR) por alternativa.

Las más cercanas a la inversión más rentable son aquellas que cumplen al máximo los requisitos para los tres índices. En la Tabla 6 se muestran las alternativas en orden de prelación según cada IR y considerando a todos juntos.

Tabla 6. Orden de prelación de alternativas según los diferentes IR y en función de los tres juntos (Todos).

IR	1	2	3	4	5	6	7	8
TIR	A	G	D	B	C	H	E	F
TR	A	C	H	F	G	E	D	B
VAN	A	B	C	D	E	F	G	H
Todos	A	C	D	G	E	B	H	F

Según el interés de los inversores se puede ponderar la valoración en función de uno de ellos únicamente. Así es que para obtener el mayor ahorro energético durante la vida útil del inmueble convendría elegir la H que tiene un buen TR, pero si se desea que además de una eficiencia energética alta permita un buen rendimiento económico en función de los tres IR (Tabla 6), se seleccionaría D o también la G pues ambas alcanzan 54% respectivamente en viviendas orientadas N-S y E-O, o la C en el caso N-S, que llega a 44%.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la presente sección se sintetiza una discusión de los resultados obtenidos en los tres aspectos principales que componen la investigación, referidas al análisis climático, el comportamiento térmico-energético edilicio y su valoración económica.

6.1. Clima y Estrategias Arquitectónicas de Diseño

El estudio realizado en función de un ATC permite salvar las dificultades que podría presentar el utilizar los datos de un único año, el cual podría no ser suficientemente representativo de las características meteorológicas del sitio. Actualmente se trabaja en ampliar la serie para comprender el lapso 2002-2018 con los datos recolectados por Pontoriero et al. (44) teniendo en cuenta la variación por efecto del cambio climático, a fin de contar con una base más sólida y precisa. La aplicación de diferentes métodos para la definición de estrategias arquitectónicas de diseño bioclimático permite verificar y ampliar el espectro de posibilidades.

- Según ABC es necesaria calefacción artificial solo un 10.8% del tiempo, pudiendo lograr el bienestar térmico con medidas pasivas un 52.1%, que sumadas al 37.1% en que reina confort natural, completan un 89.2% anual. Las estrategias más importantes son la calefacción solar pasiva (26.3%) y la inercia térmica tanto en verano como invierno (18.2%).
- El Modelo BNA estima que las mayores necesidades de acondicionamiento térmico en San Juan son de calefacción (52%) y sombreado (51%), y define los meses y horas en que es conveniente implementar cada estrategia.
- Conforme a GWS-EBH solo son necesarias medidas de calefacción activas el 4.9% del tiempo, mientras que durante el 61.5% puede abastecerse con estrategias pasivas y el 33.7% está en confort higrotérmico, donde el 11.5% permanece en la zona ampliada. El 66.3% anual requiere protección solar, el 51.1% calefacción y el 44.1% refrescamiento. También diferencia los horarios de días tipo mensuales en que es necesaria cada recomendación.
- El Modelo MET-Me pondera la inercia térmica, las organizaciones cerradas, los aventanamientos pequeños y la protección solar, sin asignar valores cuantitativos.

En base a lo detallado en el punteo anterior, se observa que los tres métodos cuantifican entre 33% y 33,9% anual de confort, ABC determina para calefacción artificial un 10,8%, GWS-EBH solo un 4,9%, y BNA establece para calefacción en general un porcentaje similar que ABC (52% y 51,1% respectivamente), pero GWS-EBH un 55,9%. Las diferencias en refrescamiento van de 15% en BNA a 10,4% en GWS-EBH y 11,4% en ABC. Para próximas investigaciones, con un ATC ampliado, se pretende sumar la aplicación de los métodos Climate Consultant (54) y el de Triángulos de Confort (55).

6.2. Comportamiento Térmico-Energético Edilicio

Las variaciones del consumo real medido en los tres años testigos se debieron a múltiples factores. Entre los más notorios se encuentran las mejoras en las condiciones socio-económicas de los habitantes, la disminución de los precios de electrodomésticos, principalmente de los equipos AA frío-calor, sumado a la oferta de planes de financiamiento accesibles, como también a los cambios del clima, habiendo sido 2006 el más cálido, y 2013 el más frío.

Para la evaluación térmico-energética del caso referencia (vivienda original) y las ocho alternativas propuestas, se decidió aplicar la normativa nacional existente, a diferencia de otras investigaciones similares (32) (33) (35) (36), en las cuales se utiliza el método carga-colector de Douglas Balcomb (56). Mientras que este método toma como consideración especial la ganancia solar, la Norma IRAM 11604 no la tiene en cuenta y usa solo los Grados-Día de calefacción, como única referencia climática del cálculo que realiza en base a la temperatura de confort determinada, que es en este caso 24°C. Tampoco considera efectos de sombreado o ventilación natural.

Estas características no permiten diferenciar las viviendas según la orientación, que sí es posible con las Normas IRAM 11659-1 (2004) y 11659-2 (2007) de refrigeración, pero sin considerar los Grados-Día de refrescamiento. De este modo, Qcal tiene unidades de energía (kWh) y Qref de potencia (kW), dificultando estimar la Carga Térmica anual total.

Para aplicar el procedimiento apropiado a la estación estival, se definió en función de las encuestas realizadas en Investigaciones previas, una familia tipo y el uso estándar de electrodomésticos, que se mantuvieron constantes para todas las alternativas analizadas. Aquí se pudieron considerar las cuatro situaciones para cada tipología, según el lugar que ocupan en el par y la orientación de la fachada. A fin de solucionar el inconveniente de incompatibilidad de unidades, es que se multiplica Qref por la cantidad de horas en que es necesario refrescamiento durante el año (52), obtenidas en base al ATC.

Así las alternativas D y H que tienen aislación térmica en los muros, alcanzan los mayores porcentajes de ahorro (56% y 54%), aunque también la G (54%) que disminuye notablemente ganancia de calor en verano con un buen sistema de persianas en sus aberturas, como en C (36%) y es esta medida la que permite mejorar el rendimiento respecto a A y B (33% y 35%). La evaluación térmico-energética no es suficiente al momento de decidir su materialización, pues los costos asociados serán imperativos cuando existen limitaciones presupuestarias.

6.3. Análisis Micro-Económico

Un factor que debilita la validez de una valoración económica en el ciclo de vida es la gran inestabilidad socio-económica y política reinante en el país, donde los supuestos y previsiones pueden quedar sin efecto de un momento a otro. Aun cuando se hagan análisis en diferentes escenarios, la gran incertidumbre dificultaría tomar decisiones. Asociado a este factor negativo está el alto nivel inflacionario, que incide en forma directa sobre los cálculos que se realizan.

Actualmente la tasa de interés bancaria para operaciones de mercado es mayor al 60%, y de aplicarla en la fórmula jamás podrían considerarse rentables ninguna de las alternativas. Medidas como las propuestas tienen un carácter social, por las ventajas que representan tanto para los usuarios directos, como para el ambiente y la sociedad en general. La monetización de estos beneficios suele dar lugar a controversias en cuanto a los criterios a aplicar, pero es conveniente emplear una evaluación social sobre todo cuando se abarcan muestras mayores a las aquí consideradas. Es por este motivo que en el presente caso se utiliza una tasa de interés tan baja.

En evaluaciones previas efectuadas con precios altamente subsidiados de la energía, las mejoras propuestas no eran rentables o tenían muy baja rentabilidad. Al aumentar tanto las tarifas, se pensó que entonces resultarían convenientes todas las alternativas, pero el efecto cadena de escalamiento de precios en todos los artículos comerciales fue exponencial en los relacionados con la construcción, empeorando la situación. Por ello, se aclara que la validez de los resultados obtenidos en el presente trabajo se limita a los supuestos definidos bajo las condiciones de entorno expuestas.

La herramienta elaborada para realizar los cálculos facilita llevar a cabo estudios de sensibilidad a las diferentes variables, lo cual sería motivo de una investigación en sí misma.

7. CONCLUSIONES

La metodología desarrollada, abarca los tres aspectos fundamentales e inescindibles para este tipo de análisis, consistentes en lo climático, lo térmico-energético y lo económico relativos al ámbito edilicio. Tanto la sistematización de los procedimientos en función de la información disponible localmente, como los soportes informáticos elaborados para su procesamiento y para realizar los

cálculos necesarios, son una contribución a la temática y constituyen una sólida base para continuar completando y perfeccionando.

Los resultados numéricos del caso de estudio son indicadores del comportamiento energético de numerosas viviendas similares pertenecientes a una gran cantidad de barrios suburbanos de la ciudad de San Juan, y se puede hacer una proyección de carácter global a universos mucho más amplios para percibir el impacto en escala urbana. Por ejemplo, si se supone que en cada vivienda de Ar se hiciese una inversión promedio de €3,426.00, ésta se amortizaría en 8.6 años con una TIR del 4.5%, y permitiría un ahorro energético medio anual de 43%, durante 25 años, reportando un beneficio neto de €1,569.00 al finalizar ese período (Tablas 4 y 5). Bajo estas condiciones la suma total de la ganancia lograda con las 383 viviendas individuales del barrio Ar se elevaría entonces a € 601,117.00, propiciando una disminución del orden de 26.85 GWh en el consumo de energía y de la contaminación ambiental asociada, además de permitir mejoras en los niveles de confort higrotérmico y en la calidad de edificación.

La evaluación realizada sobre una muestra, tanto en el diagnóstico inicial como en las propuestas, y su proyección en escala, indica que se justifica ampliamente actuar con urgencia en el sector residencial sanjuanino mediante políticas fuertes que alienten la inversión en las mejoras tecnológicas, permitiendo a la vez una rehabilitación adecuada, antes que las viviendas cumplan una mayor antigüedad. De este modo, se evitaría una hipoteca energética en el sector residencial, y se lo transformaría en una usina que contribuiría a mejorar el ambiente.

El ejemplo evaluado demuestra que los criterios, procedimientos y herramientas desarrollados y aplicados en la presente investigación, son instrumentos prácticos para este fin, cuyos cálculos estacionarios poseen las limitaciones propias de la serie 11600 (1996-2012) de las Normas IRAM (48). La metodología aquí propuesta puede ser de utilidad para facilitar la toma de decisiones políticas referidas a la rehabilitación de envoltentes de viviendas sociales a fin de implementar los planes de promoción que sean necesarios.

8. AGRADECIMIENTOS

El contenido del artículo resume resultados parciales de proyectos de investigación financiados por la Universidad Nacional de San Juan bajo los códigos PIC21/A 0942 y 0955.

9. REFERENCIAS

- (1) Thuvander L. (2000). *The Building Stock: A Complex System Changing over Time*. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden.
- (2) ECTP (2004). *Plataforma Europea de Tecnología de la Construcción, el medio ambiente construido y el edificio de eficiencia energética*. <http://www.ectp.org/>
- (3) TABULA. (2009-2012). *Typology Approach for Building Stock Energy Assessment*. <http://www.building-typology.eu/>.
- (4) EPISCOPE (2013-2016). *Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks*. <http://episcopes.eu/monitoring/overview/>
- (5) BUILD UPON2 (2015-2020). *Boosting low carbon building renovation across Europe*. <https://www.worldgbc.org/news-media/build-upon-2-boosting-low-carbon-building-renovation-across-europe>
- (6) HRE (2016-2019). *Heat Road Map*. https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2019/02/HRE_Final-Brochure_web.pdf

- (7) 4RinEU (2016-2020). Modelos confiables para renovación profunda. <http://4rineu.eu/>
- (8) iBRoad (2017-2020). Individual Building Renovation Roadmap. <http://www.ibroad-project.eu/>
- (9) EffiBuilding (2018). Energy Efficient Building. <http://www.effibuilding.eu/>
- (10) OurB (2018-2020). Our Buildings. Long term Strategies for Deep Energy Retrofitting. <http://bpie.eu/publication/eu-energy-performance-of-buildings-directive-guidance-for-public-officers-navigating-new-requirements-for-renovation-strategies/>
- (11) RenoZEB (2018-2020). Renovation Zero Energy Building. <https://renozeb.eu/>
- (12) HEART (2019). Holistic Energy and Architectural Retrofit Toolkit. <https://heartproject.eu/wp-content/uploads/2019/05/D2.2-Application-context-Periodic-Update-II.pdf>
- (13) STUNNING (2019). SusTainable bUsiNess models for the deep reNOvation of buiLdiNGs. https://www.stunning-project.eu/fileadmin/user_upload/data_repository/WP4/D4.2_FINAL.pdf
- (14) EU Energy-performance-buildings-directive (2010). <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings/energy-performance-buildings-directive>
- (15) EU Commission Recommendation 2019/1019 on building modernization. (2019). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32019H1019>
- (16) Zirngibl, J., François, C. (2010). *Information paper on EN 15459 Economic evaluation procedure for energy systems in buildings*. Project CENSE. European Communities. https://www.buildup.eu/sites/default/files/content/P160_EN_CENSE_EN_15459.pdf
- (17) García-Erviti, F., Armengot-Paradinas, J., Ramírez-Pacheco, G. (2015). El análisis del coste del ciclo de vida como herramienta para la evaluación económica de la edificación sostenible. Estado de la cuestión. *Informes de la Construcción*, 67(537): e056, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.12.119>.
- (18) Lizundia, I., Etxepare, L., Sagarna, M., & Uranga, E. J. (2018). El coste de la obligatoria rehabilitación energética de la vivienda colectiva: ¿un problema social?. *Informes de la Construcción*, 70(551): e269. <https://doi.org/10.3989/ic.59856>
- (19) Castaño-Rosa, R., Solís-Guzmán, J., Marrero, M. (2017, 27-29/03). Módulo de Inversiones para la Rehabilitación Energética de Edificios de viviendas: Revisión y Aplicación al Indicador Pobreza Energética. Libro de Actas del 3er Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Eco-Eficientes, 365-375. Sevilla, España.
- (20) Boermans, T., Grözinger, J., von Manteuffel, B., Surmeli-Anac, N., Ashok, J., Leutgöb, K., Bachner, D. (2015). *Assessment of cost optimal calculations in the context of the EPBD (ENER/C3/2013-414) Final report*. ECOFYS by order of European Commission. <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/>
- (21) Marmolejo Duarte, C. (2016). La incidencia de la calificación energética sobre los valores residenciales: un análisis para el mercado plurifamiliar en Barcelona. *Informes de la Construcción*, 68(543): e156, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.16.053>.
- (22) Evans, J. (2010). *Sustentabilidad en Arquitectura*. Professional Association of Architects Planners. Buenos Aires.
- (23) Czajkowski, J., Gomez, A. (2011). *Cuadernos de Arquitectura Sustentable*. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional de La Plata. Buenos Aires.
- (24) IRAM (2017). *Norma 11.900: Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- (25) Stagnitta, R. (2017). Proyecto de etiquetado de viviendas. Provincia de Santa Fé. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA) Edición Especial*. De Schiller, S. (Ed.).
- (26) Suarez, E. (2017). Sistema de medición de performances en edificios “Etiquetación de Sustentabilidad Edilicia”. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA) Edición Especial*. De Schiller, S. (Ed.).
- (27) Decreto Ley 134 (2015). Declárase emergencia del Sector Eléctrico Nacional. Boletín Oficial de la República Argentina.
- (28) Evans, J. M. (2017, 24-27/10). Intensidad energética y eficiencia en el sector vivienda en Argentina, 2006-2015. *Actas de la XI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medioambiente (ASADES)*, Vol. 5, 33-44. San Juan, Argentina.
- (29) Blasco Lucas, I. (2019, 13/06). Rehabilitación sustentable en el parque edilicio residencial: micro-urbanizaciones barriales del Gran San Juan. Conferencia en el *Congreso Internacional de Arquitectura Sustentable (CICAS)*. Secretaría de Estado de Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno de la Provincia de San Juan, e IRPha-FAUD-UNSJ. San Juan, Argentina.
- (30) BEN (2017). *Balances Energéticos Nacionales, series 1990-2017*. Ministerio de Energía y Minería (MINEM), Buenos Aires, Argentina. <https://www.argentina.gob.ar/energia/hidrocarburos/balances-energeticos>
- (31) Blasco Lucas, I. (2008). Aportes de la Arquitectura Sustentable en el Sector Residencial, sobre el Balance Energético-Ambiental Argentino. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*, Vol. 12, 07.17-07.24.
- (32) Esteves, A., Verstraete, J., Vilapriño, R. (1992). *Evaluación económica de conservación de energía y estrategias de diseño bioclimático en viviendas de interés social*. Gobierno de la Provincia de Mendoza, Argentina.
- (33) Verstraete, J., Vilapriño, R. (2001). Evaluación económica de conservación de energía y estrategias de diseño bioclimático en viviendas sociales. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*, Vol. 5 ; 01.33-01.38.
- (34) Rosenfeld, E., Discoli, C., Dubrovsky, H., Czajkowski, J., San Juan, G., Ferreyro, C., Rosenfeld, Y., Gómez, A., Gentile, C., Martini, I., Hoses, S., Pinedo, A., (1999). Eficiencia energética y URE en los sectores residencial-terciarios Metropolitanos. las aglomeraciones del Gran Buenos Aires y Gran La Plata. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*, Vol. 4: 05.01-05.04.
- (35) Yarque, E., Alonso, P. (2006, 23-25/08). Un programa de cálculo para optimizar la relación entre sustentabilidad energética y rentabilidad de sistemas solares pasivos: el programa OPTIMIX. Versión 3.1. *Actas del XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construido (ANTAC)*. Florianópolis, Brasil.
- (36) Arq.Bio (2012). *Programa online de optimización de edificios bioclimáticos. Basado en OPTIMIX 3.1 de Yarke E*. Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE). Centro Científico Tecnológico Mendoza (CCT-CONICET). <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/lahv/soft/mezcla/index2.php>

- (37) Blasco Lucas, I., Hoesé, L., Rosés, R., Carestia, C., Facchini, M., Gómez, W., Pontoriero, D., Hidalgo, E., Simón, L., De La Torre, M. (2004). *Vivienda, clima y energía: Diagnóstico y propuestas en casos de estudio*. Ediciones IRPHA-FAUD-UNSJ. San Juan, Argentina.
- (38) Blasco Lucas, I. (2006). *Potencial de ahorro energético en áreas residenciales, desde un enfoque bioclimático*. Ediciones FAUD-UNSJ. San Juan, Argentina.
- (39) Blasco Lucas, I. (2011). Evaluación del comportamiento térmico-energético de alternativas bioclimáticas de mejoras en tipologías FONAVI. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*, Vol. 15, 05.09-05.18.
- (40) Blasco Lucas, I. (2011). Valoración microeconómica de alternativas bioclimáticas en viviendas existentes. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*, Vol. 15, 05.19-05.28.
- (41) MINEM (2016). *Informes estadísticos anuales del sector eléctrico*. Ministerio de Energía y Minería. Secretaría de Gobierno de Energía. Subsecretaría de Planeamiento Energético. Dirección Nacional de Información Energética. <http://datos.minem.gob.ar/dataset/anuarios-de-energia-electrica>
- (42) ENARGAS (2016). *Gas entregado y cantidad de usuarios, por tipo de usuario y Provincia*. Ente Nacional Regulador del Gas. <https://www.enargas.gob.ar/secciones/transporte-y-distribucion/datos-operativos-sec.php?sec=1>
- (43) Blasco Lucas, I., Hoesé, L. (2016). Definición de estrategias de acondicionamiento térmico edilicio para San Juan a partir de un “año tipo climático”. *Arquitecto* 8, 21-30.
- (44) Pontoriero, D., Hoesé, L. (2017). *Banco de datos meteorológicos de la ciudad de San Juan*. Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan.
- (45) Mesa, A. (2002). *BNA: Método Bruce-Novell Ampliado*. Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda, Centro Científico y Tecnológico Mendoza.
- (46) USC (2006). *ABC: Software Architectural Bioclimatic Classification 1.3*. Universidad de San Carlos, Estado de San Pablo, Brasil.
- (47) Blasco Lucas, I. (2013). *Arquitectura Sustentable en hábitat rural de zona árido-sísmica: Aportes teórico-metodológicos*. (Tesis Doctoral en Arquitectura). Universidad de Mendoza.
- (48) IRAM (1996-2012). *Serie de Normas 11.600 y 11.500 relacionadas con el acondicionamiento térmico de edificios*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires.
- (49) Sapag Chain, N., Sapag Chain, R. (2008). *Preparación y evaluación de proyectos*. McGraw-Hill.
- (50) Duffy, J., Beckmann, W. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. 4ta. Edición. Wiley Interscience, NY.
- (51) Samuelson, P., Nordhaus, W. (2004). *Microeconomía*. McGraw-Hill Interamericana Ed. S.A. NY.
- (52) Blasco Lucas, I., Rosés, R., Facchini, M., Hoesé, L. (2012). Procedimiento para estimar el consumo energético destinado a climatización de viviendas. *Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA)* 27, 1-10.
- (53) CIRCOT (2019). *Índices de la construcción generados para modelos de viviendas y obras en general*. Centro de Investigación para la Racionalización de la Construcción Tradicional “Ing. Carlos Eudoro Vázquez Cabanillas”. <http://www.circot.unsj.edu.ar/circot/web/indices>
- (54) Liggett, R., Milne, M., Gomez, C., Leeper, D. (2018). *Climate Consultant 6*. UCLA Energy Design Tools Group. California. USA.
- (55) Evans, J. M. (2007). *The Comfort Triangles. A new tool for bioclimatic design*. (Tesis Doctoral). Universidad Técnica de Delft.
- (56) Balcomb, D., Jones, R., Mac Farland, R., Wray, W. (1982). *Performance Prediction of Passive Solar Heated Buildings by the Solar Load Ratio Method*. Los Alamos Scientific Laboratory. University of California.
